

Stanislav Kitarović, *University of Zagreb, FMENA, Ivana Lučića 5, Zagreb, Croatia*
stanislav.kitarovic@fsb.hr
Vedran Žanić, *University of Zagreb, FMENA, Ivana Lučića 5, Zagreb, Croatia*
vedran.zanic@fsb.hr

EKSTREMNO SAVIJANJE TANKOSTJENIH KUTIJASTIH NOSAČA: ANALIZE PROGRESIVNOG KOLAPSA

Sažetak

Među trenutno najznačajnijim pristupima analizi graničnog savojnog opterećenja ukrepljenih tankostjenih konstrukcija najviše se ističu: geometrijski i materijalno nelinearna metoda konačnih elemenata, koja je u tu svrhu potencijalno najtočnija; te različite verzije Smithove metode, koje propisuje većina klasifikacijskih društava te su vjerojatno najrasprostranjenije među svim trenutno upotrebljavanim metodama. Rezultati obje metode uspoređeni su s dobro dokumentiranim eksperimentima čistog savijanja ukrepljenih kutijastih nosača. Pri tome je evaluacija i diskusija utjecaja različitih metodoloških aspekata relevantnih za razmatrani problem provedena uzimajući u obzir i globalnu i lokalnu razinu odziva razmatranih konstrukcija.

Ključne riječi: Tankostjeni kutijasti nosač, granična nosivost, granična čvrstoća, analiza progresivnog kolapsa, nelinearna metoda konačnih elemenata, Smithova metoda.

EXTREME BENDING OF STIFFENED BOX-GIRDERS: PROGRESSIVE COLLAPSE ANALYSES

Summary

Two of the most distinctive contemporary approaches in ultimate bending load capacity analysis of the stiffened thin-walled structures are: geometrically an materially nonlinear finite element method, which is potentially the most accurate one; and various versions of the Smith's method, prescribed by the most classification societies and probably the most widely spread among all of the currently used methods. The results of both methods are benchmarked against well documented experiments of extreme pure and bending of stiffened box girders. Influence of the various methodological aspects of relevance for the considered problem is evaluated and discussed considering both global and local response level.

Key words: Stiffened box girder, ultimate load-capacity, ultimate strength, progressive collapse analysis, nonlinear finite element method, Smith's method.

1. Uvodna razmatranja

Kolaps nosive konstrukcije općenito se može definirati kao granično stanje nosivosti pri kojem konstrukcija gubi sposobnost otpora narinutom vanjskom opterećenju. Ovim radom obuhvaćene monotone tankostjene konstrukcije sastoje se od prizmatičnih uzdužnih segmenata međusobno odijeljenih okvirnim poprečno nosivim sastavnim elementima koji su ortogonalni u odnosu na uzdužno nosive sastavne elemente. U tome smislu se i različiti načini njihovog globalnog kolapsa mogu okarakterizirati kao uzdužni i poprečni. Do uzdužnog globalnog kolapsa dolazi gubitkom nosivosti uzdužno orijentiranih nosivih elemenata konstrukcije pri čemu dolazi do značajnog smanjenja krutosti konstrukcije pri osnom opterećenju, savijanju, smiku ili uvijanju, dok do poprečnog globalnog kolapsa dolazi gubitkom nosivosti poprečnog orebrenja pri čemu dio uzdužnih elemenata gubi oslonac. Uzdužni i poprečni globalni kolaps u općem slučaju nisu nezavisni, jer moguće je primjerice da uzdužni globalni kolaps obuhvati jedan ili više poprečnih okvira, tj. dva ili više susjednih uzdužnih segmenata konstrukcije. Pri tome je analizom graničnog stanja nosivosti potrebno obuhvatiti mnogobrojne i različite moguće kombinacije gubitka uzdužne i poprečne nosivosti sastavnih elemenata razmatrane konstrukcije, što u pravilu nije moguće ostvariti u realno ograničenom vremenskom okviru konceptualne faze višekriterijskog projektiranja (sigurnost konstrukcije kao projektni kriterij i/ili cilj, [1]). Stoga se pri projektiranju konstrukcije uvode dodatna ograničenja vezano uz geometrijske i materijalne karakteristike poprečnih okvirnih nosača kako bi se osigurala izvjesnost pojave između-okvirnog kolapsa (eng. *interframe collapse*) uzdužno nosivih elemenata prije pojave bilo kojeg složenijeg načina kolapsa koji bi obuhvatio više od jednog uzdužnog segmenta konstrukcije. Na ovaj način ostvaruje se mogućnost raspregnutog razmatranja uzdužnog i poprečnog globalnog kolapsa te je moguće analizirati svaki uzdužni segment zasebno.

Na uzdužni globalni kolaps mnogih tankostjenih konstrukcija najveći utjecaj ima savojno opterećenje te se stoga uzdužna granična nosivost izražava kao najveći iznos momenta unutrašnjih uzdužnih sila kojega je moguće ostvariti na poprečnom presjeku kritičnog uzdužnog segmenta razmatrane konstrukcije. Ukoliko intenzitet narinutog savojnog opterećenja dosegne na taj način formuliranu graničnu razinu nosivosti konstrukcije, smatra se da dolazi do uzdužnog globalnog kolapsa konstrukcije, tj. da je progresivnim gubitkom nosivosti sastavnih elemenata kritičnog uzdužnog segmenta savojna krutost njegovog presjeka smanjena na graničnu razinu. Pri tome do progresivnog gubitka nosivosti sastavnih elemenata dolazi njihovim popuštanjem i/ili različitim načinima izvijanja. Pri analizi progresivnog kolapsa najčešće se uzdužni segment konstrukcije na poziciji najvećeg momenta savijanja identificira kao kritični te se razmatra promjena njegove nosivosti pri povećanju intenziteta savijanja kao najznačajnijeg načina opterećenja konstrukcije. Utjecaj efekata ostalih momenata (savijanja i uvijanja), smičnih sila te lokalnog opterećenja (tlaka) pri tome se zanemaruje te predstavlja predmet postojećih [2] i budućih istraživačkih radova koautora.

1.1. Smithova inkrementalno-iterativna metoda analize progresivnog kolapsa

Jedan od značajnih aspekata izvjesnosti pojave između-okvirnog kolapsa prije svih ostalih tipova globalnog kolapsa je što se time osigurava i gredni karakter ponašanja konstrukcije (velika krutost presjeka na pozicijama okvirnih nosača) tokom čitavog kolapsnog procesa. Ova činjenica predstavlja temeljnu premisu Smithove metode [3], koja se smatra rodonačelnom među metodama analize progresivnog kolapsa, jer je prva omogućila naprednije razmatranje kolapsne sekvence i poslije-kritične nosivosti elemenata tankostjene konstrukcije opterećene savijanjem. Do danas je predloženo nekoliko u osnovi vrlo sličnih metoda zasnovanih na Smithovom pristupu. U području brodogradnje pravila mnogih klasifikacijskih društava, kao i IACS-ova Združena pravila za konstrukciju [4], [5] propisuju

korištenje inkrementalno-iterativnih procedura zasnovanih na Smithovoj metodi. U okviru ovoga rada korištena je IACS-ova inkrementalno-iterativna metoda analize progresivnog kolapsa, koja je računalno implementirana unutar računalnog projektnog sustava OCTOPUS [6], pri čemu se definicija strukturnog modela vrši pomoću računalnog alata MAESTRO [7].

1.2. Geometrijski i materijalno nelinearna analiza metodom konačnih elemenata

U analizi graničnog stanja nosivosti najtočniji rezultati mogu se postići primjenom metode konačnih elemenata nad trodimenzionalnim diskretiziranim modelom cijele konstrukcije, te provođenjem geometrijski i materijalno nelinearne analize (NLMKE) kako bi se simulirao i evaluirao odziv konstrukcije pri raznim razinama narinutog opterećenja. Međutim, pri tome dobiveni rezultati jako ovise o ispravnosti primijenjenih tehnika opisa i idealizacije razmatrane konstrukcije (geometrijska i materijalna svojstva diskretiziranog modela) i rubnih uvjeta (opterećenja i ograničenja poopćenih pomaka). Iako je uvijek poželjno razmatrati model cijele konstrukcije, često se pri analizi razmatraju parcijalni modeli radi ograničene količine raspoloživog računalnog vremena i/ili vremena za pred/poslije-procesiranje, pri čemu još više dolazi do izražaja osjetljivost rezultata analize na idealizaciju realnih rubnih uvjeta. Nadalje, korišteni materijalni modeli trebaju što točnije definirati odnose između naprezanja i deformacije u pred-kolapsnom, kolapsnom i poslije-kolapsnom režimu, a na odgovarajući način treba uzeti u obzir i utjecaj svih relevantnih inicijalnih nesavršenosti razmatrane konstrukcije, koje u znatnoj mjeri mogu utjecati na iznos izračunate granične nosivosti. Svi prethodno spomenuti aspekti primjene NLMKE uvjetuju njenu vrlo rijetku primjenu u svrhu određivanja granične nosivosti složenih tankostjenih konstrukcija pri njihovom konceptualnom projektiranju. Njena primjena u kontekstu predmetne problematike svodi se uglavnom na analize parcijalnih modela s ciljem verifikacije alternativnih proračunskih metoda, ili rjeđe potpunih modela konstrukcija u svrhu određivanja uzroka i rekonstrukcije okolnosti stvarnih događaja kolapsa konstrukcije tokom eksploatacije. U okviru ovoga rada sve NLMKE analize provedene su korištenjem računalnog alata FEMAP/NX Nastran [8], pri čemu su razmatrani modeli diskretizirani dvodimenzionalnim izoparametrijskim konačnim elementima sa četiri (CQUAD4) i vrlo rijetko tri (CTRIA3) čvora. Materijalna nelinearnost idealizirana je primjenom elastičnog-idealnooplastičnog (bi-linearnog) materijalnog modela bez očvršćenja, a funkcija popuštanja izražena je pomoću HMH uvjeta popuštanja. Za rješavanje nelinearnih jednadžbi krutosti korištena je (nemodificirana) Newton-Raphsonova metoda.

1.3. Idealizacija inicijalnih nesavršenosti razmatranih konstrukcija

Svi primjeri razmatrani u okviru ovoga rada spadaju u zavarene metalne konstrukcije koje stoga nakon gradnje u pravilu karakterizira pojava zaostalih naprezanja i inicijalnih geometrijskih odstupanja (IGO) od zamišljenog oblika. Bez obzira na primijenjenu metodu evaluacije graničnog stanja nosivosti, IGO se u pravilu uzimaju u obzir, jer njihov oblik i iznos uvijek u značajnoj mjeri utječu na izvijanje tlačno opterećenih sastavnih elemenata konstrukcije. U IACS-ovoj metodi je utjecaj IGO implicitno sadržan unutar korištenih $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja (izrazi za efektivne vrijednosti širine oplate i/ili visine struka ukrepe definirani su s obzirom na srednju razinu amplitude IGO), dok se u slučaju primjene NLMKE položaj čvorova diskretiziranog modela najčešće modificira sukladno pristupu zasnovanom na tri različita tipa izvijanja sastavnih dijelova razmatrane konstrukcije [9], pri čemu se oblik sva tri tipa IGO idealizira periodičkim funkcijama zasnovanim na Fourierovim redovima, dok se ukupni oblik odstupanja određuje njihovom superpozicijom. Pri tome se amplitude odstupanja u većini radova novijeg datuma (pa tako i u okviru ovoga rada) određuju sukladno Smithovoj formulaciji koja u odnosu na formulaciju klasifikacijskih društava predstavlja sveobuhvatniju idealizaciju pogodnu za sve debljine oplate.

2. Razmatrane konstrukcije

U okviru ovoga rada razmatra se uzdužna granična nosivost ukrepljenih monotonih tankostjenih nosača čiji je odziv pri ekstremnom čistom ravnom savijanju (stanje progiba) istražen eksperimentalno [10]. Pri tome se razmatraju tri različite konstrukcije (označene sa P1, P2 i P3) čije geometrijske i materijalne karakteristike prikazuju Tablice 1 do 3. Među razmatranim konstrukcijama od naročitog značaja je konstrukcija P1 za koju su izvršena detaljna mjerenja inicijalnih geometrijskih odstupanja oplata gornjeg pojasa nosača. Iako modeliranje čitavog gornjeg pojasa sukladno detaljnom opisu njegovih IGO značajno komplicira izradu NLMKE modela konstrukcije P1, na taj način se omogućava točnija idealizacija geometrijskih karakteristika tlačno najopterećenijeg dijela razmatrane konstrukcije, što u znatnoj mjeri utječe na rezultate analize. U nedostatku podataka vezano uz IGO ostalih sastavnih dijelova konstrukcije isti su se aproksimirali sukladno prethodno spomenutom pristupu zasnovanom na Fourierovim redovima, pri čemu su relevantne amplitude odstupanja određene za srednju razinu amplitude IGO prema Smithu.

Table 1. Structural geometry and material characteristics of the model P1.

Tablica 1. Geometrijske i materijalne karakteristike komponenti modela P1.

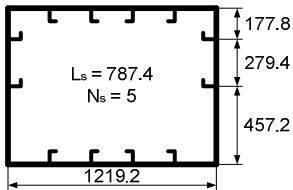
	Komponenta	Nominalne dimenzije [mm]	σ_Y [N/mm ²]	E [N/mm ²]
	Oplata gornjeg pojasa	4.76	298.07	208498
	Oplata donjeg pojasa	4.76	298.07	208498
	Oplata struka	3.18	211.59	216220
	Uzdužne ukrepe	L 50.8x4.76 / 15.88x4.76	276.45	191509
	Poprečno orebrenje	L 76.2x6.35 / 50.8x6.35	310.43	196143

Table 2. Structural geometry and material characteristics of the model P2.

Tablica 2. Geometrijske i materijalne karakteristike komponenti modela P2.

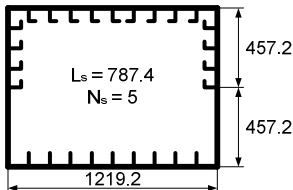
	Komponenta	Nominalne dimenzije [mm]	σ_Y [N/mm ²]	E [N/mm ²]
	Oplata gornjeg pojasa	4.76	220.85	206954
	Oplata donjeg pojasa	4.76	216.22	208498
	Oplata struka	4.76	281.09	214676
	Uzdužne ukrepe (gornji pojas i struk)	L 50.8x4.76 / 15.88x4.76	287.26	199231
	Uzdužne ukrepe (donji pojas)	FB 50.8x6.35	304.25	206954
	Poprečno orebrenje	L 101.6x6.35 / 63.5x6.35	304.25	200776

Table 3. Structural geometry and material characteristics of the model P3.

Tablica 3. Geometrijske i materijalne karakteristike komponenti modela P3.

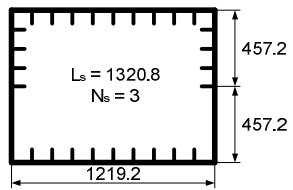
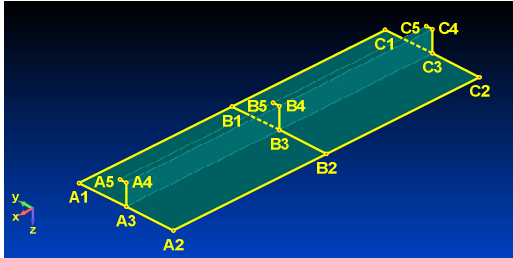
	Komponenta	Nominalne dimenzije [mm]	σ_Y [N/mm ²]	E [N/mm ²]
	Oplata gornjeg pojasa	4.76	220.85	206954
	Oplata donjeg pojasa	4.76	216.22	208498
	Oplata struka	4.76	281.09	214676
	Uzdužne ukrepe (gornji pojas i struk)	L 50.8x4.76 / 15.88x4.76	287.26	199231
	Uzdužne ukrepe (donji pojas)	FB 50.8x6.35	304.25	206954
	Poprečno orebrenje	L 101.6x6.35 / 63.5x6.35	304.25	200776

Table 4. Boundary conditions (convergence study model).

Tablica 4. Mjesta zadavanja rubnih uvjeta (model korišten za studiju konvergencije rješenja).

	Pozicija čvora	Stupnjevi slobode					
		Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
	$\langle A1-A3 \rangle, [A2-A3], [A3-A4], [A4-A5], \langle C1-C3 \rangle, [C2-C3], [C3-C4], [C4-C5]$	0*	1	1	1	0	0
	$\langle A1-B1 \rangle, \langle B1-C1 \rangle, \langle A2-B2 \rangle, \langle B2-C2 \rangle$	1	0	1	0	1	0
	$\langle B1-B3 \rangle, \langle B2-B3 \rangle, \langle B4-B5 \rangle$	1	1	0	1	1	1
	$\langle B3-B4 \rangle$	1	0	1	1	1	1
	A1, A2, C1, C2.	0	0	1	0	0	0
	B1, B2.	1	0	0	0	1	0
	B3, B4.	1	0	0	1	1	1

0 Spriječeno.

1 Dozvoljeno.

* U svim čvorovima presjeka „A“ zadana je jednaka vrijednost opterećenja (pomak u negativnom smjeru osi x), pri čemu se taj isti stupanj slobode ograničava isključivo radi pravila zadavanja te vrste opterećenja u korištenoj aplikaciji.

Prije izrade diskretiziranog NLMKE modela konstrukcije P1 potrebno je racionalno odrediti prikladnu rezoluciju mreže konačnih elemenata. U tu svrhu provedena je studija konvergencije rješenja, pri čemu se kao reprezentativni i kritični dio konstrukcije razmatra jedna ukrepa sa sunosivom širinom oplata gornjeg pojasa konstrukcije P1. Sukladno smjernicama i naputcima iz relevantne literature (npr. [9]) razmatrani model po duljini obuhvaća dva polu-raspona između poprečnih okvirnih nosača (tzv. $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$ model) dok po širini obuhvaća dvije polu-širine razmaka između ukrepa. S obzirom da pri tome poprečni okvirni nosač nije eksplicitno modeliran, njegov utjecaj je implicitno zadan pomoću rubnih uvjeta na presjeku B (Tablica 4). S obzirom na opterećenje gornjeg pojasa pri progibnom savijanju konstrukcije P1, razmatrani model se jednoosno tlači uzdužnim pomakom jednoliko raspodijeljenim po presjeku A. Pri tome je iznos narinutog uzdužnog pomaka određen tako da se provedbom NLMKE analize obuhvati prije-kolapsni, kolapsni i poslije-kolapsni režim odziva razmatranog modela.

Studija konvergencije rješenja provedena je za četiri različite razine IGO (mala, srednja i velika po Smithu te srednja po Pravilima) kako bi se proanalizirao utjecaj njihovog intenziteta na dobivene rezultate, pri čemu je za svaku razinu IGO razmatrano osam različitih razina profinjavanja (rezolucija) mreže konačnih elemenata. Slika 1 ilustrira oblik sva tri prethodno spomenuta tipa IGO (bez obzira na iznos amplitude) za razmatrani model, kao i konačni oblik dobiven njihovom superpozicijom.

Slika 2 prikazuje (normalizirane) $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje dobivene NLMKE analizama osam različitih rezolucija mreže razmatranog modela uz narinutu srednju razinu IGO prema Smithu, dok Slika 3 prikazuje vrijednosti normalizirane granične nosivosti (maksimumi krivulja na Slici 2), poslije-kolapsne nosivosti (pri $\varepsilon_{xA} = 1.1\varepsilon_Y$) te vertikalnog čvornog pomaka točke A2 za različite rezolucije (ukupni broj stupnjeva slobode) mreže razmatranog modela.

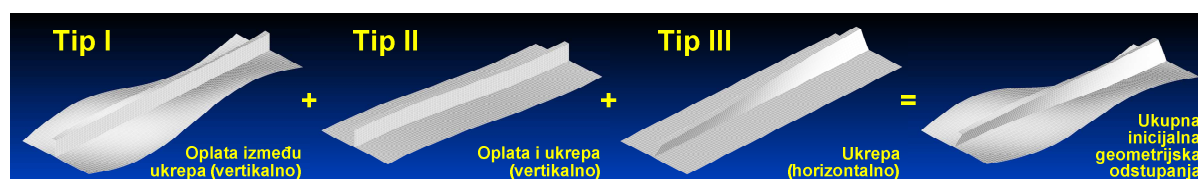


Figure 1. Superposition of different types of geometric imperfections for plate-stiffener combination.

Slika 1. Superpozicija različitih tipova IGO za model ukrepe sa sunosivom širinom oplata.

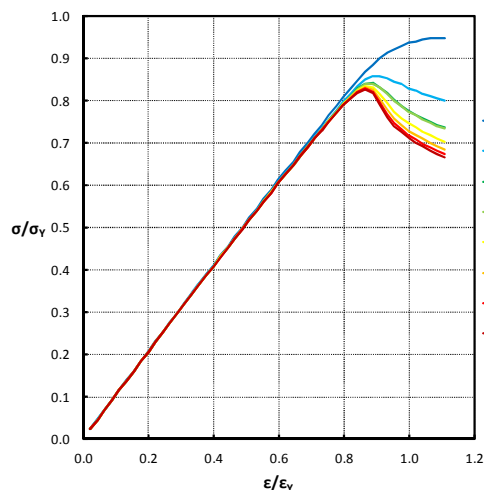


Figure 2. Normalized $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ curves.
Slika 2. Normalizirane $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje.

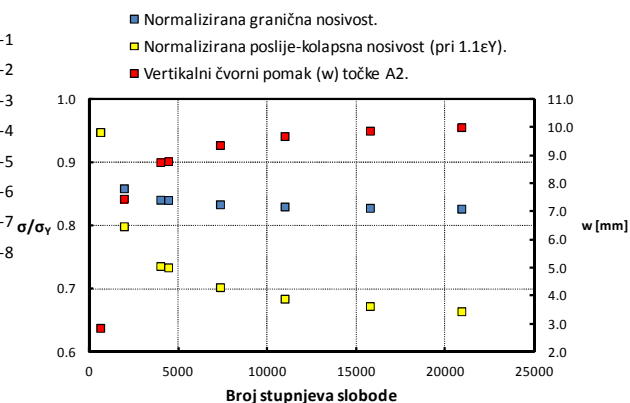


Figure 3. Comparison of relevant results.
Slika 3. Usporedba različitih rješenja.

Pri provedbi studije konvergencije rješenja (u kontekstu razmatranog problema) u relevantnoj literaturi se najčešće prati samo iznos dobivene granične nosivosti. Na prikazanim slikama vidi se da se vrijednost granične nosivosti relativno brzo stabilizira (već nakon četvrte razine profinjenja mreže), što vrijedi za sve razine IGO. Međutim, isto tako je razvidno da se poslije-kolapsna nosivost razmatranog modela značajno mijenja sa promjenom rezolucije mreže, tj. da se rješenje stabilizira tek pri vrlo finim rezolucijama mreže. S obzirom da će u stanju granične nosivosti razmatrane konstrukcije njene sastavne elemente karakterizirati različita razina nosivosti, tj. dio njih će biti u prije-kolapsnom, dio u kolapsnom, a dio u poslije-kolapsnom stanju, vrlo je važno da se i poslije-kolapsna nosivost sastavnih elemenata opiše što točnije. Zanimljivo je da se pri određivanju prikladne rezolucije mreže za čitavu konstrukciju može rezultirati preoptimistično određenim razinama nosivosti razmatrane konstrukcije prije, tokom, a naročito poslije kolapsnog režima. Stoga će se pri izboru prikladne rezolucije mreže u obzir uzeti i konvergencija poslije-kolapsne nosivosti (pri $\varepsilon_{xA} = 1.1\varepsilon_y$), granične deformacije te najvećeg vertikalnog (poprečnog) čvornog pomaka (točka A2), jer je uočeno da se niti vrijednosti vertikalnih čvornih pomaka ne stabiliziraju brzo. Slika 4 sažeto prikazuje konvergenciju svih prethodno spomenutih rješenja (za srednju razinu IGO prema Smithu), kao i promjenu broja stupnjeva slobode s obzirom na rješenja i broj stupnjeva slobode pri najfinijoj mreži.

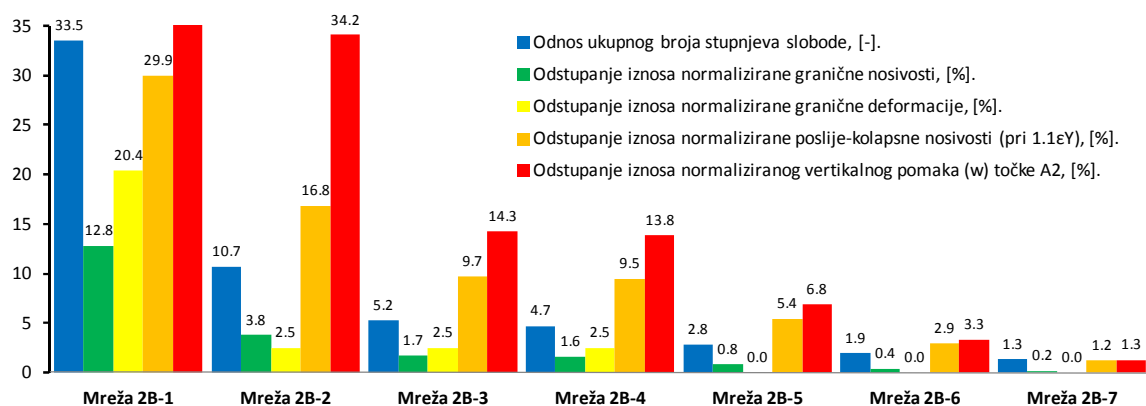
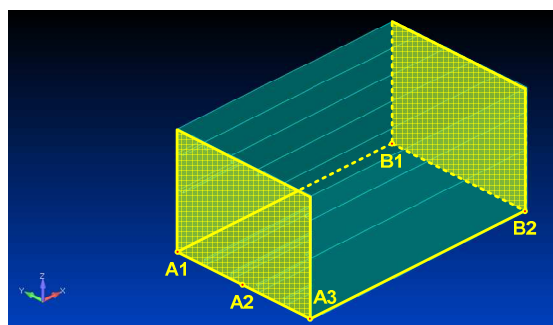


Figure 4. Solution convergence for average level of imperfections (Smith) with respect to Mesh 2B-8 solutions.
Slika 4. Konvergencija rješenja za srednju razinu (Smith) IGO s obzirom na rješenja dobivena za Mrežu 2B-8.

Table 5. Loads and boundary conditions for NLFEM model of the P1 structure.

Tablica 5. Mjesta zadavanja ograničenja pomaka i opterećenja za diskretizirani NLMKE model konstrukcije P1.



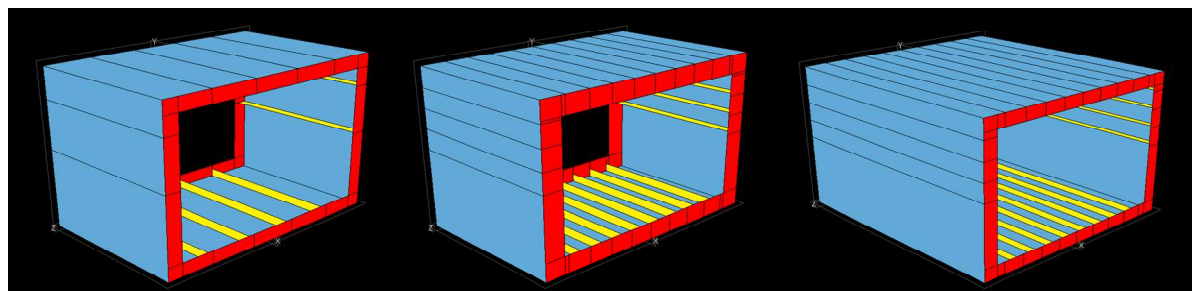
Pozicija čvora	Stupnjevi slobode					
	Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
A2.	1	0	0	0	0*	0
Presjek „B“.	0	1	1	1	0	0

0 Spriječeno.
1 Dozvoljeno.
* U čvoru koji se nalazi u točki A2 zadano je opterećenje rotacijom oko osi y (koje se preko krutih veza prenosi na sve ostale čvorove presjeka „A“), pri čemu se taj SS ograničava isključivo radi pravila zadavanja te vrste opterećenja u korištenoj aplikaciji.

Na temelju prikazanih podataka odabrana je šesta razina profinjjenja kao referentna rezulucija mreže za diskretizaciju NLMKE modela konstrukcije P1. S obzirom da na toj rezoluciji mreže (neovisno o razini inicijalnih geometrijskih odstupanja) sva relevantna rješenja odstupaju od najtočnijeg rješenja za samo nekoliko postotaka uz skoro dvostruko manji broj stupnjeva slobode, nema racionalnog opravdanja za izbor finije mreže. Sa druge pak strane, iako bi se grubljim mrežama značajno smanjio broj stupnjeva slobode modela, njihova pojedina rješenja (poslije-kolapsna nosivost i poprečni pomak) karakteriziraju nezanemariva odstupanja u odnosu na najtočnije rješenje.

Polovinski NLMKE model (polovica ukupnog uzdužnog raspona) konstrukcije P1 diskretiziran je sa ukupno 78640 konačnih elemenata sa ukupno 78883 čvora (473298 stupnjeva slobode). Svi čvorovi uzdužno orijentiranog materijala (svi dijelovi konstrukcije osim poprečnih okvornih nosača) dislocirani su sukladno izračunu IGO (za srednju razinu amplitude prema Smithu) s izuzetkom čvorova oplata gornjeg pojasa koji su dislocirani sukladno rezultatima mjerenja IGO. Kako bi se simuliralo progibno čisto ravno savijanje sukladno eksperimentu, opterećenje je zadano u obliku rotacije presjeka A oko osi y (Tablica 5) koja se tokom analize inkrementalno mijenja od nulte do zadane vrijednosti (0.0075 rad). Opterećenje je zadano u čvoru koji se nalazi u točki A2 presjeka A te se posredstvom krutih veza (RBE2 element, [8]) prenosi na sve ostale čvorove presjeka A. S obzirom da se prilikom provođenja eksperimentalnog testiranja na presjeku A nalazio zavareni spoj s (vrlo krutim) prijenosnikom opterećenja, a presjek B je dio ravnine simetrije (opterećenja i oblika) konstrukcije P1, rubni uvjeti su zadani na način kako opisuje Tablica 5.

Slika 5 prikazuje modele uzdužnih segmenata konstrukcija P1, P2 i P3 (izrađene pomoću računalne aplikacije MAESTRO), na osnovu kojih se provodi diskretizacija za IACS-ovu metodu analize progresivnog kolapsa (implementiranu u okviru računalne aplikacije OCTOPUS).



Slika 5. One-bay model (span of one web frame spacing) of the P1, P2 and P3 structures.

Slika 5. Modeli uzdužnog segmenta (uzdužni raspon između okvornih nosača) konstrukcija P1, P2 i P3.

3. Usporedba rezultata

Slika 6 prikazuje rezultate analize granične nosivosti konstrukcije P1 pri progibnom čistom ravnom savijanju dobivene primjenom IACS-ove metode u obliku $M-\kappa$ dijagrama progresivnog kolapsa. Ista slika prikazuje i rezultate analize granične nosivosti za istu konstrukciju, dobivene eksperimentalnim ispitivanjem. S obzirom da su rezultati eksperimentalnog ispitivanja objavljena u obliku ovisnosti opterećenja o prosječnom poprečnom (vertikalnom) pomaku strukova konstrukcije na sredini njenog ukupnog raspona (w_M), pri čemu vertikalni pomak težišta (neutralne osi) poprečnog presjeka (relevantan za korektan izračun odgovarajućih iznosa fizikalne zakrivljenosti) ostaje nepoznat, dobivene rezultate nije moguće prikazati u istome obliku, tj. u okviru istoga dijagrama. Analogno prethodnom opisu, Slika 7 i Slika 8 prikazuju dobivene rezultate za konstrukcije P2 i P3.

Tablica 6 usporedno prikazuje granični moment savijanja određen eksperimentalno i IACS-ovom metodom, pri čemu je uočljivo značajnije odstupanje rezultata za konstrukcije P1 i P2 uzrokovano korištenim $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivuljama te pravilima diskretizacije. Naime, kritični dio sve tri konstrukcije (ukrepljeni gornji pojas) diskretizira se gotovo u potpunosti gredama tankostjenog presjeka. Utvrđeno je pri tome da je za te elemente u sva tri slučaja referentni način gubitka nosivosti gredno-štapno izvijanje, opisano odgovarajućom $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivuljom. U slučaju konstrukcije P1, s obzirom na relativno veliku vitkost oplate (između ukrepa) gornjeg pojasa i njen relativno mali odnos stranica, gubitak nosivosti gornjeg pojasa zapravo je dominantno uvjetovan s kolapsom oplate, a ne ukrepa (sa sunosivom širinom oplate). U slučaju konstrukcije P2, dvostruko veći broj ukrepa, manja vitkost i veći odnos stranica oplate između ukrepa rezultiraju boljim opisom nosivosti sastavnih elemenata kritičnog dijela konstrukcije, tj. u konačnici i manjim odstupanjem od eksperimentalnih rezultata. U slučaju konstrukcije P3, velik broj ukrepa velike duljine između oslonaca (eng. *unsupported length*) te ostale geometrijske i materijalne karakteristike oplate i ukrepa unutar tlačne zone uvjetuju dominantnost gredno-štapnog karaktera kolapsa tog dijela konstrukcije u zbilji, što u konačnici rezultira i relativno malim odstupanjem od eksperimentalnih rezultata. Na temelju rečenog može se zaključiti da korištene (IACS-ove) $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje uz zadana pravila diskretizacije nisu univerzalno podobne za proizvoljne konfiguracije ukrepljenih panela, tj. da se njihovom primjenom u slučaju ukrepljenih panela vitke oplate s relativno malim brojem ukrepa ne postižu zadovoljavajuće točni rezultati.

Kako bi se loš utjecaj korištenih krivulja na konačne rezultate analize sveo na najmanju mjeru, za sve diskretne sastavne elemente konstrukcije P1 (koji tokom analize progresivnog kolapsa mogu biti opterećeni tlačno) određene su $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje provedbom NLMKE analiza nad jednoosno uzdužno (tlačno) opterećenim modelima diskretiziranim u referentnoj rezoluciji mreže s IGO srednje razine amplitude prema Smithu. Kako bi se mogle na odgovarajući način uključiti u IACS-ovu metodu, dobivene $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje su aproksimirane pomoću nategnutog B-splinea [11], koristeći postojeće fortranske potprograme dostupne u okviru javne biblioteke FITPACK [12].

Table 6. Comparison of the obtained and experimental results.
Tablica 6. Usporedba dobivenih rezultata s obzirom na eksperiment.

Oznaka konstrukcije	Granični moment savijanja [kNm]		Relativno odstupanje*
	Eksperiment	IACS-ova metoda	
P1	1546.7	1771.6	-12.69 %
P2	2214.1	2444.4	-9.42 %
P3	1331.6	1379.6	3.48 %
* Relativno odstupanje računa se na sljedeći način: % = $(M_{UE} - M_{UP}) / M_{UP} \cdot 100$;			
M_{UE}	Granični moment savijanja određen eksperimentalno;		
M_{UP}	Granični moment savijanja određen polaznom/predloženom metodom;		

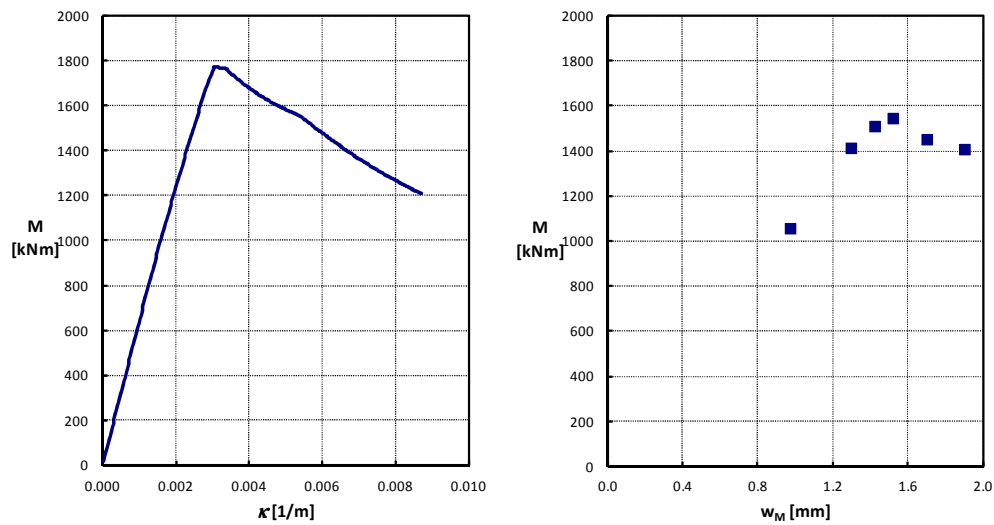


Figure 6. Ultimate strength analysis results for P1 structure (IACS method and experimental testing).
Slika 6. Rezultati analize granične nosivosti konstrukcije P1 (IACS-ova metoda i eksperimentalno ispitivanje).

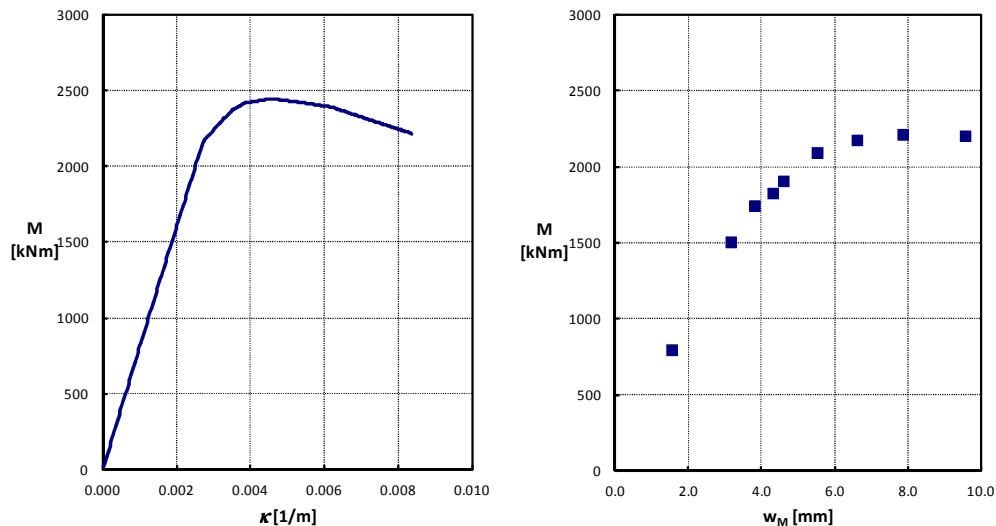


Figure 7. Ultimate strength analysis results for P2 structure (IACS method and experimental testing).
Slika 7. Rezultati analize granične nosivosti konstrukcije P2 (IACS-ova metoda i eksperimentalno ispitivanje).

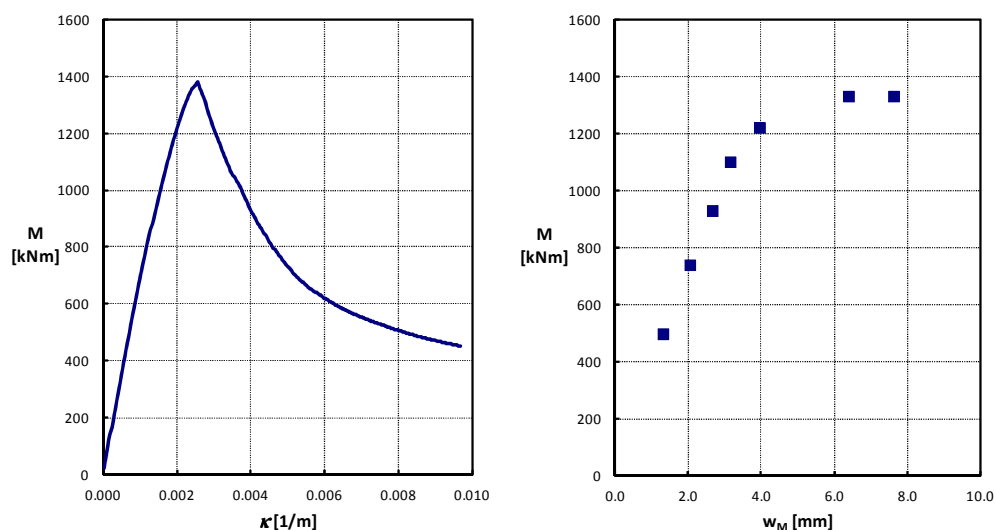


Figure 8. Ultimate strength analysis results for P3 structure (IACS method and experimental testing).
Slika 8. Rezultati analize granične nosivosti konstrukcije P3 (IACS-ova metoda i eksperimentalno ispitivanje).

Table 7. Boundary conditions (hard corner model).**Tablica 7.** Opis čvornih ograničenja pomaka (element krutog kuta).

	Pozicija čvora	Stupnjevi slobode					
		Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
	$\langle A1-A2 \rangle, [A2-A3], \langle C1-C2 \rangle, [C2-C3]$.	0*	1	1	1	0	0
	$\langle A1-B1 \rangle, \langle B1-C1 \rangle$.	1	0	1	0	1	0
	$\langle A3-B3 \rangle, \langle B3-C3 \rangle$.	1	1	0	0	1	0
	$\langle B1-B2 \rangle$.	1	1	0	1	1	1
	$\langle B2-B3 \rangle$.	1	0	1	1	1	1
	B2.	1	0	0	1	1	1
	B1, B3.	1	0	0	0	1	0
	A1, C1.	0*	0	1	0	0	0
	A3, C3.	0*	1	0	0	0	0

0	Spriječeno.
1	Dozvoljeno.
*	U svim čvorovima presjeka „A“ zadana je jednaka vrijednost opterećenja (pomak u pozitivnom smjeru osi x), pri čemu se taj isti stupanj slobode ograničava isključivo radi pravila zadavanja te vrste opterećenja u korištenoj aplikaciji.

Pri generiranju $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja za modele ukrepa sa sunosivom širinom oplata gornjeg pojasa i struka konstrukcije P1 korišteni su rubni uvjeti identični onima koji su korišteni pri studiji konvergencije rješenja (Tablica 4). Mjesta zadavanja i opis rubnih uvjeta za model krutih kutova prikazuje Tablica 7, a Tablica 8 za model poprečno orebrene oplata. Slika 9 prikazuje rezultirajuće $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulje za različite diskretne sastavne elemente usporedno sa svim IACS-ovim $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivuljama (relevantnim za pojedini diskretni sastavni element). Pri tome se (osim u slučaju gornjih ukrepa sa sunosivom širinom oplata struka konstrukcije) može uočiti značajnije odstupanje između IACS-ovih i NLMKE $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja, što je naročito izraženo u slučaju poprečno orebrene oplata.

Slika 10 usporedno prikazuje rezultate analize granične nosivosti konstrukcije P1 pri čistom ravnom savijanju dobivene IACS-ovom metodom uz upotrebu IACS-ovih i NLMKE $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja. Pri tome se može uočiti značajno odstupanje među dobivenim vrijednostima graničnog momenta savijanja (22.18 %). Ista slika prikazuje i vrijednosti momenta unutrašnjih uzdužnih sila (na središnjem poprečnom presjeku konstrukcije P1) za pojedine inkremente intenziteta narinutog opterećenja pri NLMKE analizi.

Table 8. Boundary conditions (transversely stiffened plate model).**Tablica 8.** Opis čvornih ograničenja pomaka (element poprečno orebrene oplata).

	Pozicija čvora	Stupnjevi slobode					
		Tx	Ty	Tz	Rx	Ry	Rz
	$\langle A1-A2 \rangle, \langle C1-C2 \rangle$.	0*	1	1	1	0	0
	$\langle A1-B1 \rangle, [B1-C1], \langle A2-B2 \rangle, [B2-C2]$.	1	0	0	0	1	0
	$\langle B1-B2 \rangle$.	1	1	0	1	1	1
	A1, A2, C1, C2.	0*	0	0	0	0	0

0	Spriječeno.
1	Dozvoljeno.
*	U svim čvorovima presjeka „A“ zadana je jednaka vrijednost opterećenja (pomak u pozitivnom smjeru osi x), pri čemu se taj isti stupanj slobode ograničava isključivo radi pravila zadavanja te vrste opterećenja u korištenoj aplikaciji.

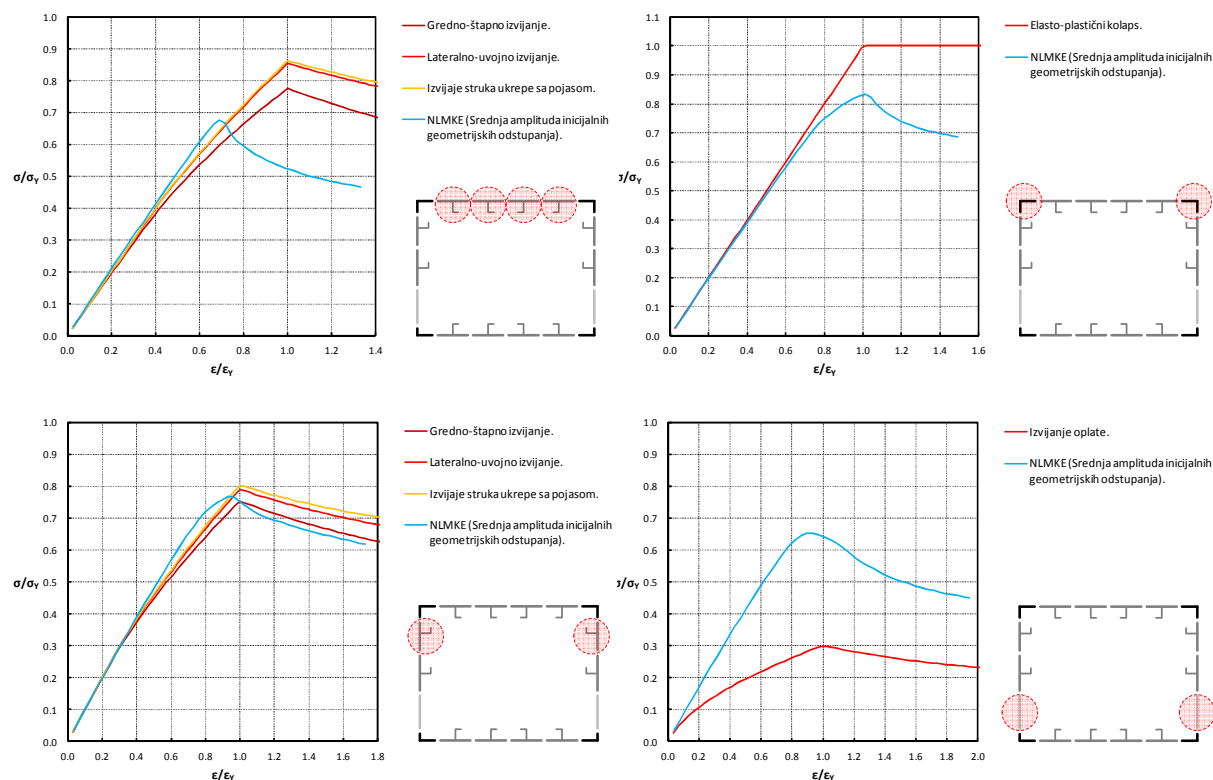


Figure 9. Comparison of IACS and NLFEM $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ curves for various discrete elements of P1 structure.
Slika 9. Usporedba IACS i NLMKE $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja za različite diskretne sastavne elemente konstrukcije P1.

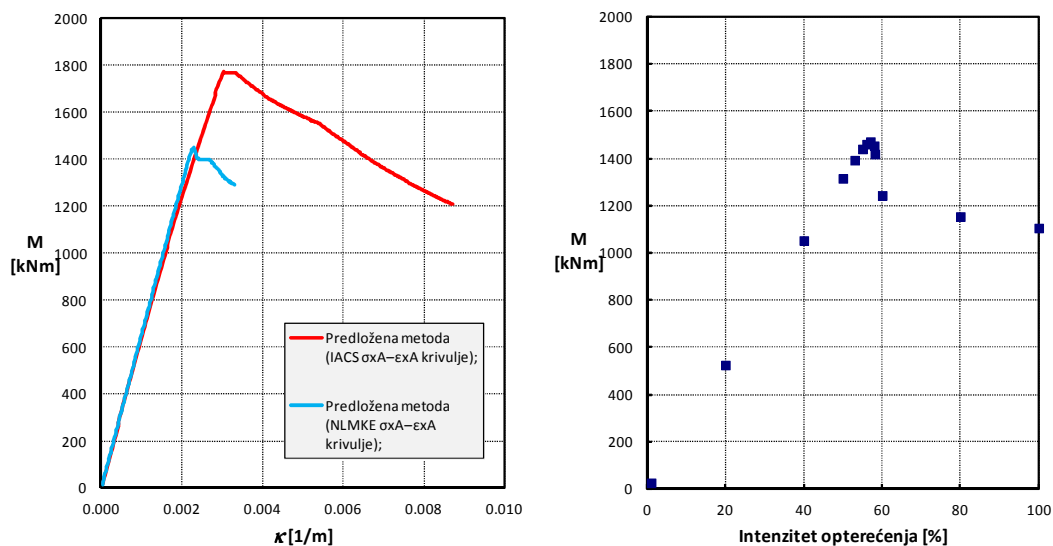


Figure 10. Ultimate strength analysis results for P1 structure (IACS method and NLFEM).
Slika 10. Rezultati analize granične nosivosti konstrukcije P1 (IACS-ova metoda i NLMKE).

Table 9. Comparison of the results obtained with respect to experimental testing.

Tablica 9. Usporedba dobivenih rezultata s obzirom na eksperiment.

Metoda analize konstrukcije P1	M_U [kNm]	Relativno odstupanje*
NLMKE	1472.1	5.07 %
IACS metoda (NLMKE krivulje)	1450.1	6.66 %
IACS metoda (IACS krivulje)	1771.6	-12.69 %

* Relativno odstupanje računa se s obzirom na eksperimentalni rezultat i to na sljedeći način:
 $\% = (M_{UE} - M_U) / M_U \cdot 100$;

4. Zaključak

U okviru ovoga rada argumentirana je potreba za sveobuhvatnijim pristupom pri provedbi studija konvergencije rješenja u kontekstu razmatranog problema i/ili određivanja $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja pomoću NLMKE. Nadalje, pokazano je da formulacija aktualnih IACS-ovih krivulja nije univerzalno podobna za proizvoljne konfiguracije ukrepljenih panela, tj. da se njihovom primjenom u slučaju ukrepljenih panela s relativno malim brojem ukrepa i vitkom oplatom (između ukrepa) većeg odnosa stranica ne postižu zadovoljavajuće točni rezultati. Tablica 9 usporedno prikazuje rezultate svih primijenjenih simulacijskih metoda s obzirom na eksperimentalne rezultate (za konstrukciju P1). Pri tome se može uočiti da se primjenom NLMKE $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja postigla gotovo dvostruko bolja razina točnosti rezultata IACS-ove metode. Isto tako, nezanemariva je činjenica da je pri tome dobiveni rezultat konzervativnog karaktera („na strani sigurnosti“) u odnosu na eksperimentalnu referencu, za razliku od rezultata dobivenog primjenom IACS-ovih $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja. S obzirom da je za razmatrani slučaj (konstrukcije i opterećenja) odstupanje vrijednosti graničnog momenta savijanja određenog IACS-ovom metodom (uz primjenu NLMKE $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja) u odnosu vrijednost određenu NLMKE analizom svega 1.52 %, može se zaključiti da takav pristup razmatranom problemu predstavlja kvalitetnu alternativu NLMKE analizi globalnog modela razmatrane konstrukcije. Uz vrlo dobro poklapanje rezultata, na taj način mogu se postići značajnije uštede u vremenu potrebnom za izgradnju modela konstrukcije te provedbu analize, što naročito dolazi do izražaja u slučaju složenih tankostjenih konstrukcija sastavljenih od mnoštva elemenata identičnih geometrijskih i materijalnih svojstava (jedna $\sigma_{xA} - \varepsilon_{xA}$ krivulja za sve identične sastavne elemente).

ZAHVALE

Koautori se zahvaljuju Ministarstvu znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske na dugoročnoj potpori kroz znanstveno-istraživački projekt 120-1201829-1671.

LITERATURA

- [1] ŽANIĆ, V., KITAROVIC, S., PREBEG, P.: “Safety as objective in multicriterial structural optimization” Proceedings of the 29th International Conference in Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Shanghai, 2010, p.899-910.
- [2] KITAROVIC, S.: “Analysis of longitudinal ultimate load-capacity in concept synthesis of thin-walled structures”, Doctoral thesis, University of Zagreb, FMENA, Zagreb, 2012. (in Croatian).
- [3] SMITH, C.S.: “Influence of local compressive failure on ultimate longitudinal strength of a ship's hull”, Proceedings of the International Symposium on Practical Design in Shipbuilding, Tokyo, 1977, p.73-79.
- [4] ...: “Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers”, International Association of Classification Societies, London, 2012.
- [5] ...: “Common Structural Rules for Bulk Carriers”, International Association of Classification Societies, London, 2012.
- [6] ...: “OCTOPUS Software Documentation”, University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, 2009.
- [7] ...: “MAESTRO Software Documentation“, DRS-C3 Advanced Technology Center, Stevensville, 2007.
- [8] ...: “FEMAP/NX Nastran Software Documentation”, Siemens Product Lifecycle Management Software, 2010.
- [9] HUGHES, O.F., PAIK, J.K.: “Ship structural analysis and design”, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2010.
- [10] DOWLING, P.J., CHATTERJEE, S., FRIEZE, P.A., MOOLANI, F.M.: “Experimental and predicted collapse behaviour of rectangular steel box girders”, Proceedings of the International Conference on Steel Box Girder Bridges, Institution of Civil Engineers, London, 1973, p.77-94.
- [11] DIERCKX, P.: “Curve and surface fitting with splines”, Oxford University Press, 1993.
- [12] Available at <http://www.netlib.org/dierckx/>, 20 July 2012.